

<기술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.12.1153

Abaqus UMAT을 이용한 형상기억합금 거동 해석

김영진[†] · 정종하* · 이정주**

(2008년 7월 2일 접수, 2008년 11월 3일 수정, 2008년 11월 11일 심사완료)

Analysis on the Behavior of the Shape Memory Alloy Using Abaqus UMAT

Young-Jin Kim, Jong-Ha Chung and Jung-Ju Lee

Key Words: Shape Memory Alloy(형상기억합금), Superelasticity Effect(초탄성효과), Shape Memory Effect(형상기억효과), Modified Brinson Model(수정 브린슨 모델), Abaqus UMAT

Abstract

In this paper, the algorithm of Abaqus UMAT is introduced to analyze the shape memory alloy. The SMA has two main effects which show non-linearity. Due to this, it is hard to analyze SMA using analysis tools and to describe all of two effects. Therefore, in this study, the program using Abaqus UMAT based on Modified Brinson model is used to analyze SMA. The martensite fraction, the most important factor which defines SMA motion, is also calculated by Fortran program in UMAT. In addition, the tensile test of SMA specimen is conducted. The availability of algorithm is proved by comparing analysis to experimental result.

기호설명

M_f : 마르텐사이트 끝 온도 [$^{\circ}\text{C}$ or $^{\circ}\text{K}$]
 M_s : 마르텐사이트 시작 온도
 A_s : 오스테나이트 시작 온도
 A_f : 오스테나이트 끝 온도
 σ_s^{cr} : 마르텐사이트 변형 시작 응력
 σ_f^{cr} : 마르텐사이트 변형 끝 응력
 C_M : 마르텐사이트 온도와 응력간의 기울기
 C_A : 오스테나이트 온도와 응력간의 기울기
 ξ : 전체 마르텐사이트 분율
 ξ_S : 응력-여기 마르텐사이트 분율

ξ_T : 온도-여기 마르텐사이트 분율
 D_M : 순수 마르텐사이트 상의 탄성계수
 D_A : 순수 오스테나이트 상의 탄성계수
 ε_L : 최대 잔류 변형률

1. 서론

형상기억합금(Shape Memory Alloy:SMA)은 온도나 하중의 변화에 의해서 초탄성(Superelasticity)이라 불리는 현상이나, 형상기억효과(Shape Memory Effect:SME)를 나타내는 금속으로 내부식성이 뛰어나며, 단위 부피 당 큰 힘을 낼 수 있어 작동기(actuator)로써 사용될 때 매우 유리하다. 또한, 구동 매커니즘이 단순하고 깨끗하며 조용하고 스파크가 없는 점 역시 장점으로 들 수 있다. 이러한 장점을 가지고 있는 형상기억합금이지만 비선형적인 거동을 보이고, 큰 히스테리시스를 가지고 있기 때문에 시뮬레이션이나 수치해

[†] 책임저자, 회원, 국방기술품질원 항공센터
 E-mail : 0jin79@hanmail.net
 TEL : (055)830-9595 FAX : (055)830-9656

* 원자력연구원

** 한국과학기술원 기계공학과

석이 어렵다. 형상기억합금 해석 연구는 와이어 해석에 관한 연구^(1,2)와 Brinson Model을 이용한 유한요소해석⁽³⁾ 등의 일차원 해석에 관한 연구에서 비선형 유한요소법을 이용한 다차원 초탄성 거동 해석,⁽⁴⁾ Brinson Model을 microplane에 적용한 해석,⁽⁵⁾ Gibbs free energy density를 이용하여 Abaqus UMAT을 이용한 해석⁽⁶⁾ 등의 다차원 거동 모사에 관한 연구로 다양하게 진행되고 있다. 특히, 상용화된 툴인 Abaqus UMAT을 이용한 와이어 해석⁽¹⁾과 Gibbs free energy density를 UMAT에 적용한 경우⁽⁶⁾를 통하여 형상기억합금 모델링과 해석에 있어서 해석 툴이 편리하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 Modified Brinson model⁽⁷⁾을 바탕으로 Abaqus UMAT에 적용하여 형상기억합금의 초탄성 효과와 형상기억효과를 모사할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 온도와 응력 이력에 따른 상변태 과정을 연속적으로 계산하고 이를 바탕으로 재료 물성치와 상변태에 따른 변형량을 구할 수 있다.

2. 해석 프로그램 개발

2.1 형상기억합금 모델

본 연구에서는 현재 형상기억합금의 거동 모사에 가장 많이 사용되고 있는 Brinson Model의 일부 오류를 수정한 Modified-Brinson Model⁽⁷⁾을 Abaqus UMAT에 적용하였다.

Modified-Brinson Model의 상변태 구간은 다음과 같다. 형상기억합금은 크게 고온에서 존재하는 오스테나이트와 저온에서 존재하는 마르텐사이트 2가지 상으로 나눌 수 있는데, 이 중에서 마르텐사이트는 응력에 의해서 생긴 응력-여기 마르텐사이트(stress induced martensite)와 온도에 의해서 생긴 온도-여기 마르텐사이트(temperature induced martensite) 2가지로 나눌 수가 있다. Fig. 1에 나타난 온도와 응력을 통하여 이 3가지 상의 변태 기준을 설정할 수 있으며 크게 9가지 영역으로 구분할 수 있다. 각 영역에 대한 간단한 설명은 아래와 같다.

- Band 0 : 순수 응력-여기 마르텐사이트 (상변태 없음)

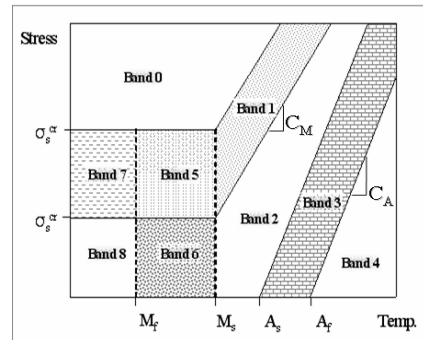


Fig. 1 Critical stress-temperature diagram

- Band 1 : 오스테나이트 또는 온도-여기 마르텐사이트로부터 응력-여기 마르텐사이트로의 변태구간
- Band 2 : 마르텐사이트와 오스테나이트의 혼재구간 (상변태 없음)
- Band 3 : 마르텐사이트로부터 오스테나이트로의 변태
- Band 4 : 순수 오스테나이트 (상변태없음)
- Band 5 : 오스테나이트로부터 온도-여기 마르텐사이트로의 변태와 오스테나이트 또는 온도-여기 마르텐사이트로부터 응력-여기 마르텐사이트로의 변태구간
- Band 6 : 오스테나이트로부터 온도-여기 마르텐사이트로의 변태구간
- Band 7 : 온도-여기 마르텐사이트로부터 응력-여기 마르텐사이트로의 변태 구간
- Band 8 : 온도-여기와 응력-여기 마르텐사이트의 혼재 구간(상변태 없음)

2.2 형상기억합금 상변태의 방향성

형상기억합금은 앞에서 언급한 바와 같이 크게 응력-여기 마르텐사이트, 온도-여기 마르텐사이트, 오스테나이트의 3가지 상을 갖는다. 이 3가지 상은 응력과 온도에 따라 상변태를 하며 존재하는데 이 상변태는 각 구간에 따라 방향성을 가지고 있다. 즉, 응력 및 온도가 상변태 구간(Band 1,3,5,6,7)에 있다고 해도 어떤 이력으로 응력과 온도의 변화가 진행이 되었느냐에 따라 상변태의 진행 여부가 결정된다. 각 구간별로 상변태의 방향성(상변태가 일어나는 조건)을 살펴보면 아래와 같다.

i) Band 1

$$\tan^{-1}C_M \leq \tan^{-1}(\Delta \text{응력} / \Delta \text{온도}) \leq \tan^{-1}C_M + 180^\circ$$

ii) Band 3

$$\tan^{-1}C_A - 180^\circ \leq \tan^{-1}(\Delta\sigma/\Delta T) \leq \tan^{-1}C_A$$

iii) Band 5, 6

온도가 감소하는 경우 온도-여기 마르텐사이트로의 상변태

iv) Band 5, 7

응력이 증가하는 경우 응력-여기 마르텐사이트로의 상변태

위의 조건을 만족하지 않는 경우에는 상변태 구간에 있다고 하여도 상변태가 일어나지 않게 되며, Band 5는 응력과 온도의 변화 상태에 따라 온도-여기 마르텐사이트와 응력-여기 마르텐사이트로의 상변태가 동시에 존재하는 곳이다.

2.3 마르텐사이트 분율 계산 프로그램

마르텐사이트 분율을 온도와 응력의 함수로 표현한 식을 진화방정식 (evolutionary equation)이라고 하며, Modified Brinson model⁽⁷⁾에서는 다음과 같이 제시하였다.

(i) 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 상변태
 - $T > M_s, \sigma_s^{cr} + C_M(T - M_s) < \sigma < \sigma_f^{cr} + C_M(T - M_s)$:

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{so}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s)] \right\} + \frac{1 + \xi_{so}}{2}$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{so}} (\xi_s - \xi_{so}) \quad (4)$$

- $T < M_s, \sigma_s^{cr} < \sigma < \sigma_f^{cr}$:

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{so}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr}] \right\} + \frac{1 + \xi_{so}}{2}$$

$$\xi_T = \Delta T_{\xi} - \frac{\Delta T_{\xi}}{1 - \xi_{so}} (\xi_s - \xi_{so}) \quad (5)$$

where, if $M_f < T < M_s$ and $T < T_0$,

$$\Delta T_{\xi} = \frac{1 - \xi_{T0} - \xi_{so}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{M_s - M_f} (T - M_f) \right\} + \frac{1 + \xi_{T0} - \xi_{so}}{2}$$

else, $\Delta T_{\xi} = \xi_{T0}$ (6)

(ii) 마르텐사이트에서 오스테나이트의 상변태

- $T > A_s, C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_s)$:

$$\xi = \frac{\xi_o}{2} \left\{ \cos \left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] + 1 \right\}$$

$$\xi_s = \xi_s - \frac{\xi_{so}}{\xi_o} (\xi_o - \xi)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_o} (\xi_o - \xi) \quad (7)$$

여기서, a_M 과 a_A , ξ 는 다음과 같으며, 하첨자 0은 초기 값을 의미한다.

$$a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f}, a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s}, \xi = \xi_s + \xi_T \quad (8)$$

Brinson model에서 형상기억합금의 탄성계수는 마르텐사이트 분율에 의해서 결정된다.⁽⁸⁾ 따라서 응력과 온도 조건에 따라 정확히 마르텐사이트 분율을 계산해 줄 수 있는 프로그램이 필요하다.

마르텐사이트 분율 계산 프로그램을 구현할 때에 중요한 점은 마르텐사이트 분율 값의 연속성과 상변태 방향성 모사이다. 즉, 프로그램이 마르텐사이트 값을 끊어지지 않고 연속적으로 잘 계산해 주어야 하며, 상변태의 방향성을 정확히 반영해야한다. 따라서 Band 1, 3, 5, 6, 7의 경우에는 내부에서 상변태의 방향이 바뀌는 경우 마르텐사이트 값이 연속적으로 나오도록 마르텐사이트 초기 값을 알맞게 계산하여 변화시켜 주어야한다. 즉, 상변태가 진행이 되다가 상변태가 진행이 안 될 경우 마르텐사이트 분율 값 계산이 멈추게 되고, 차후에 상변태가 진행이 되어 마르텐사이트 분율 값 계산이 다시 진행이 될 경우

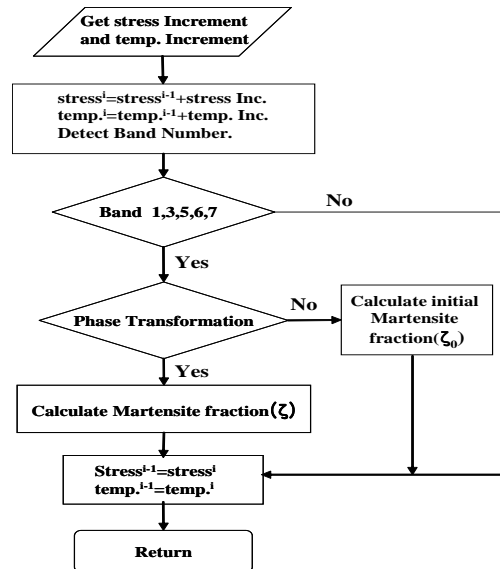


Fig. 2 Algorithm for martensite fraction

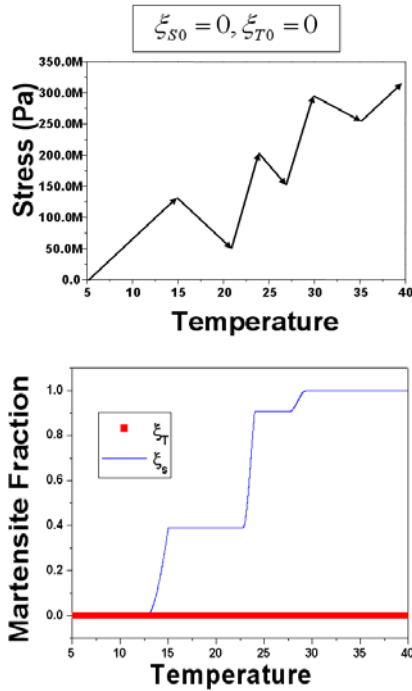


Fig. 3 Martensite fraction program verification (Martensite fraction vs. Temp.)

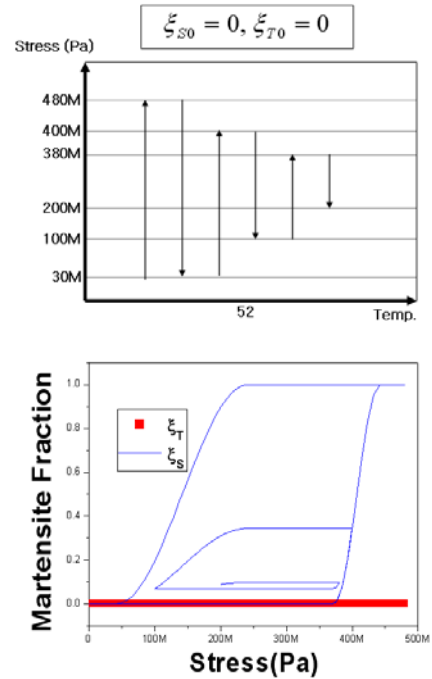


Fig. 4 Martensite fraction program verification (Martensite fraction vs. stress)

이전 값부터 연속적으로 값이 나오도록 초기 값을 다시 계산해 주어야 한다.

마르텐사이트 분율 계산을 위한 프로그램은 식 (4)~(8)을 Fortran을 이용하여 Fig. 2의 알고리즘에 따라 코딩하였다. 검증을 위해서 Fig. 3, 4와 같이 응력과 온도를 변화시키며 마르텐사이트 분율을 계산하였고 방향성과 연속성을 만족하며 결과 값이 나오고 있는 것을 확인할 수 있다.

2.4 Abaqus UMAT(user material)

Abaqus 같은 유한요소해석 프로그램은 넓은 범위의 재료 거동을 모사할 수 있다. 하지만, 점탄성 거동, Creep, 형상기억합금 같이 특수한 거동을 하는 재료는 Abaqus 자체로는 거동을 모사할 수 없다. 이러한 거동을 해석 해주기 위해서 Abaqus에서는 UMAT이라고 불리는 인터페이스를 제공한다. 형상기억합금을 미소변형(infinitesimal deformation)에서 생각하면 tangent modulus tensor를 아래와 같이 정의해 줄 수 있다.

$$C_{ijkl} = \partial \sigma_{ij} / \partial \epsilon_{kl} \tag{9}$$

UMAT을 이용하여 tangent modulus tensor를 Abaqus에 제공하여 주면 Abaqus는 global stiffness matrix를 만들어 재료의 거동을 모사하게 된다.

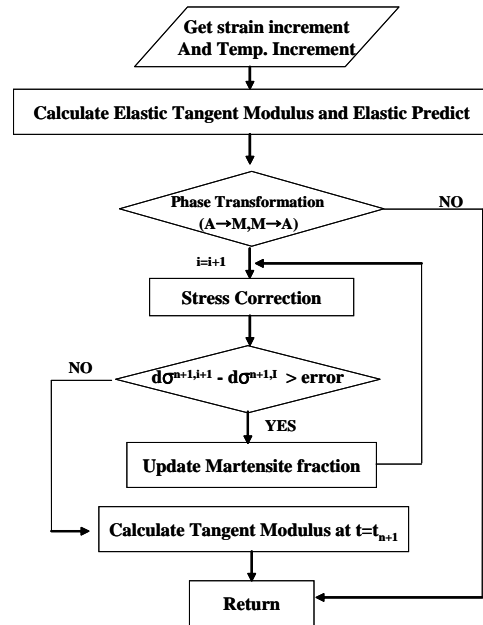


Fig. 5 Algorithm for Abaqus UMAT

UMAT을 코딩하기 위한 알고리즘은 Fig. 5와 같으며 마르텐사이트 분율 계산 프로그램을 Abaqus User Subroutine 형식으로 코딩하였다. Brinson model에서 제시된 구성방정식은 아래와 같다. 여기서 $D(\xi)$ 는 탄성계수를 의미하며, $\Omega(\xi)$ 는 변형텐서, Θ 는 열팽창계수를 의미한다.⁽⁸⁾

$$\sigma - \sigma_0 = D(\xi)\epsilon - D(\xi_0)\epsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_s - \Omega(\xi_0)\xi_{s0} + \Theta(T - T_0) \quad (10)$$

이 후의 연구에 의해서 Brinson은 식 (10)의 구성 방정식을 식 (11)과 같이 단순화 시킬 수 있음을 보였으며,⁹⁾ 식 (10)을 선형화된 증분형태로 표시 하면 식 (12)와 같다.

$$\sigma = D(\xi)(\epsilon - \epsilon_L \xi_s) + \Theta(T - T_0) = ((D_M - D_A)\xi + D_A)(\epsilon - \epsilon_L \xi_s) + \Theta(T - T_0) \quad (11)$$

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \dot{\epsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \dot{T} + \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \dot{\xi} = D \dot{\epsilon} + \Theta \dot{T} + \Omega \dot{\xi} \quad (12)$$

응력은 변형률과 온도, 마르텐사이트 분율의 함수이고 진화방정식에서 마르텐사이트의 분율 또한 응력과 온도의 함수가 되므로 진화방정식을 구성방정식에 대입하여 응력에 대한 식으로 선형화시켜 UMAT을 구성한다. 응력증분에 관한 형태로 구성방정식을 풀어주면 다음과 같다.

- (i) 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 상변태
 - $T > M_s, \sigma_s^{cr} + C_M(T - M_s) < \sigma < \sigma_f^{cr} + C_M(T - M_s)$:

$$d\sigma = \frac{D(\xi)}{1 + \frac{1 - \xi_{so}}{2} \Omega \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \sin\left\{\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s)]\right\}} d\epsilon + \frac{\Theta + \frac{1 - \xi_{so}}{2} \Omega \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \sin\left\{\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s)]\right\}}{1 + \frac{1 - \xi_{so}}{2} \Omega \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \sin\left\{\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s)]\right\}} dT \quad (13)$$

- $T < M_s, \sigma_s^{cr} < \sigma < \sigma_f^{cr}$:

$$d\sigma = \frac{D(\xi)}{1 + \frac{1 - \xi_{so}}{2} \Omega \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \sin\left\{\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr}]\right\}} d\epsilon + \frac{\Theta}{1 + \frac{1 - \xi_{so}}{2} \Omega \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \sin\left\{\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr}]\right\}} dT \quad (14)$$

- (ii) 마르텐사이트에서 오스테나이트의 상변태조건
 - $T > A_s, C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_s)$:

$$d\sigma = \frac{D(\xi)}{1 - \Omega \frac{\xi_{so}}{2} \frac{a_A}{C_A} \left\{ \sin\left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] \right\}} d\epsilon + \frac{\Theta - \Omega \frac{\xi_{so}}{2} \frac{a_A}{C_A} \left\{ \sin\left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] \right\}}{1 - \Omega \frac{\xi_{so}}{2} \frac{a_A}{C_A} \left\{ \sin\left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] \right\}} dT \quad (15)$$

Table 1 Properties of SMA (test specimen)

SE508(Ni(55.8wt%)-Ti)	SM495(Ni(54.5wt%)-Ti)
$D_A=50.6E9$ Pa	$D_M=25.3E9$ Pa
$D_M=24.9E9$ Pa	$D_A=50.6E9$ Pa
$M_S = -40.5$ °C	$M_f = 35.7$ °C
$A_s = 4.0$ °C	$M_S = 52.3$ °C
$A_f = 16.2$ °C	$A_s = 66.2$ °C
	$A_f = 87.5$ °C
$C_M=4.0E6$ Pa/°C	
$C_A=7.8E6$ Pa/°C	
$\sigma_s^{cr}=90$ MPa	$\sigma_s^{cr}=120$ MPa
$\sigma_f^{cr}=170$ MPa	$\sigma_f^{cr}=145$ MPa
$\epsilon_L=0.041$	$\epsilon_L=0.0515$

3. 실험을 통한 프로그램 검증

실험은 상온에서 마르텐사이트 상을 가지며 형상기억효과를 나타낼 수 있는 SM495(Ni(54.5wt%-Ti)와 상온에서 오스테나이트 상을 가지며 초탄성효과를 나타낼 수 있는 SE508(Ni(55.8wt%)-Ti) 두 종류의 시편을 이용하여 수행하였다. 이 시편들을 대상으로 인장실험을 수행하고 이를 Abaqus 해석 결과와 비교하였다.

3.1 특성온도 측정

형상기억합금은 4가지 특성온도 M_f, M_s, A_s, A_f 를 가지며 이 특성온도는 형상기억합금의 거동에 아주 큰 영향을 미친다. 특성온도는 일반적으로 제조사에서 주어지지만, 정확한 값을 구하기 위하여 DSC(Differential Scanning Calorimetry) 장비를 사용하여 특성 온도를 측정하였다. 이 장비는 가열, 냉각 또는 일정한 온도를 유지하는 동안 시료가 흡수 또는 방출하는 에너지를 측정하는 방법으로 형상기억합금이 상변태를 일으킬 때 잠열의 흡수 또는 방출을 측정하여 특성온도를 측정할 수 있다. 온도 변화율은 5°C/min로 하여 측정을 실시하였고 결과는 Table 1에 나타나 있다.

3.2 인장실험

ASTM의 규정에 맞추어 지름 6mm의 환봉형 시편을 준비한다. 사용된 시편은 상온에서 마르텐사이트 상을 가지며 형상기억효과를 나타내는

SM495와 상온에서 오스테나이트 상을 가지며 초탄성효과를 나타내는 SE508 두 가지 종류이다. 해석을 위해서는 형상기억합금의 최대잔류변형률, 임계응력 값 등의 물성치가 필요하기 때문에 이 인장실험을 통하여 특성온도 외의 물성치를 구하여 준다. 형상기억합금의 거동은 처음에는 안정화되어 있지 않기 때문에 Fig. 6과 같이 여러 번 부하와 제하를 반복하여 재료의 거동을 안정화 시킨다.⁽¹⁰⁾ 실험 장비는 최대 25 KN까지 시편에 하중을 가할 수 있는 FastTrack8874 (Instron)을 사용하였으며, 온도 측정을 위해서 K-type thermocouple을 이용하였다. 변형률의 측정은 형상기억합금이 최대 6~8%까지 변형이 일어나기

때문에 소성용 게이지(YEFLA-2, Tokyo Sokki, 최대 10%)를 사용하여 측정하였다. 형상기억합금의 거동은 하중 변화율의 영향을 아주 크게 받기 때문에 strain rate는 0.0001/sec~0.0002/sec 사이에서 실험을 측정하였다. 물성치는 Table 1에 나타나 있으며, 실험결과는 Fig. 7, 8에 표시되어 있다.

3.3 Abaqus UMAT을 이용한 FEM 해석 검증

Table 1의 물성치를 바탕으로 Abaqus UMAT을 이용하여 형상기억합금의 거동을 해석하였다. 3차원 요소인 C3D8I(3차원 8절점 요소)를 이용하여 총 810개의 요소로 모델링을 하였다. 먼저 시편 SM495의 경우 부하 및 제하 과정을 살펴보면 고온으로 열처리를 한 후(오스테나이트 상) 상온으로 온도가 떨어진 것(마르텐사이트 상)이기 때문에 26℃의 등온도 조건에서 응력-여기 마르텐사이트와 온도-여기 마르텐사이트 초기 값을 각 0과 1로 설정해주고 해석을 수행하였다. 결과는 Fig. 7, 8과 같다. 해석 결과가 큰 잔류 변형을 남기는 실험 결과를 유사하게 모사 하는 것을 확인할 수 있으며 제하와 부하를 반복한 Fig. 8의 경우 역시 실험결과를 잘 모사하고 있는 것을 알 수 있다. 상변태가 일어난 정도는 마르텐사이트 분율 값을 통하여 알 수가 있고 온도-여기 마르

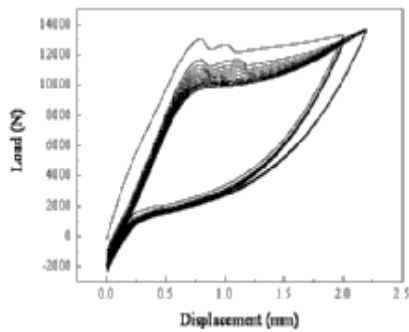


Fig. 6 Mechanical training

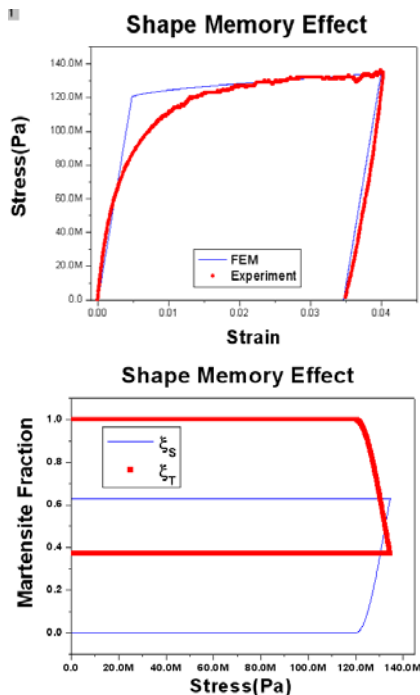


Fig. 7 FEM vs. Experiment (SM495:Ni(54.5wt%)-Ti)

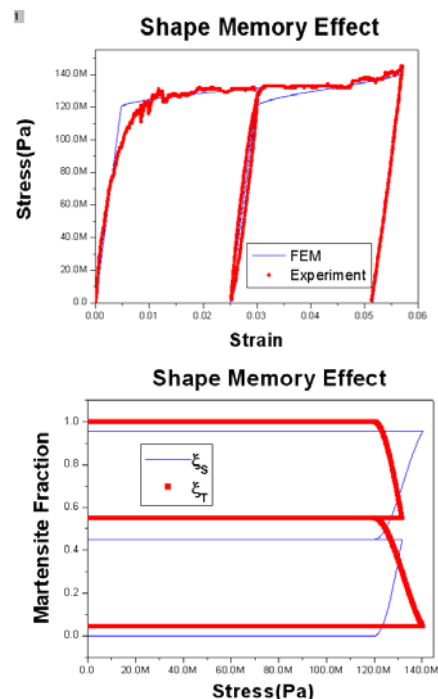


Fig. 8 FEM vs. Experiment (SM495:Ni(54.5wt%)-Ti)

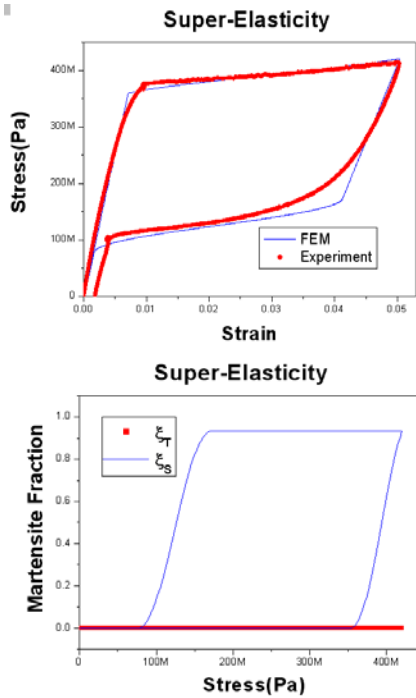


Fig. 9 FEM vs. Experiment (SE508(Ni(55.8wt%)-Ti)

텐사이트가 응력을 받으면서 응력-여기 마르텐사이트로 상변태 하는 것이 확인된다. 이를 통하여 원하는 지점에서 해석과 동시에 상변태가 어느 정도 진행이 되었는지 알 수 있다. 초탄성 효과를 살펴보기 위해 SE508을 이용하여 실험한 경우와 해석 결과를 Fig. 9, 10에 나타내었다. 상온에서 오스테나이트 상이므로 각 마르텐사이트상 초기 값은 0으로 한다. 해석 결과보다 실험 결과에서 얻은 기울기가 약간 더 완만하기 때문에 끝부분에서는 차이가 나고 있으며, 실험은 잔류 변형이 남는 오차가 나타나고 있다. 이 오차는 형상기억합금 물성치 측정의 오차와 영구적인 소성변형에 대한 가능성에서 기인한다. 상온에서 응력만 가하였기 때문에 응력-여기 마르텐사이트 값만 증가했다가 제하와 동시에 응력-여기 마르텐사이트 값이 줄어들며 오스테나이트 상으로 변태하고 있는 과정을 마르텐사이트 분율 값 변화를 통해서 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Abaqus를 이용하여 비선형 거동을 하는 형상기억합금의 거동을 모사하기 위해서 Modified Brinson model을 바탕으로 한 UMAT

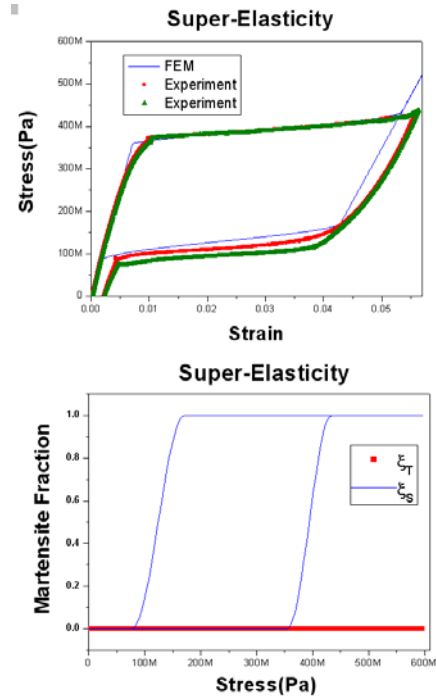


Fig. 10 FEM vs. Experiment(SE508(Ni(55.8wt%)-Ti)

algorithm과 마르텐사이트 분율 계산 algorithm을 개발하였다. 또한 상온에서 형상기억합금 효과를 나타내는 시편과 초탄성 효과를 나타내는 시편을 준비하여 인장 실험을 수행한 후 해석 결과와 비교를 통하여 개발된 프로그램이 형상기억합금의 거동을 정확히 모사하고 있음을 보였다. 이를 통하여 형상기억합금의 거동해석이 필요한 여러 응용분야로의 적용 가능성을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 비폭발식 분리장치 개발 프로젝트의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, H. J., Lee, J. J. and Heo, J. S., 1999, "A Simulation Study of the Thermal Buckling Behavior of Laminated Composite Shells Embedded Shape Memory Alloy(SMA) Wires," *Composite structures*, Vol. 47, No. 1/4, pp. 463~469.
- (2) Amalraj, J. J., Bhattacharyya, M. and Faulkner, M. G., 2000, "Finite-Element Modeling of Phase Transformation in Shape Memory Alloy Wires with

- Variable Material Properties," *Smart Mater. Struct.* 9, pp. 622~631.
- (3) Brinson, L. C. and Lammering, R., 1993, "Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and Their Application," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 30, No. 23, pp. 3261~3280.
- (4) Liew, K. M., Kitipornchai, S., Ng, T. Y. and Zou, G. P., 2002, "Multi-Dimensional Superelastic Behavior of Shape Memory Alloys via Nonlinear Finite Element Method," *Engineering Structures* 24.
- (5) Brocca, M., Brinson, L. C. and Bazant, Z. P., 2002, "Three-Dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys Based on Microplane Model," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 50, pp. 1051~1077.
- (6) Peultier, B., Zineb, B. and Patoor, E., 2006, "Macroscopic Constitutive Law of Shape Memory Alloy Thermomechanical Behavior. Application to Structure Computation by FEM," *Mechanics of Materials* 38, pp. 510~524.
- (7) Chung, J. H., Heo, J. S. and Lee, J. J., 2007, "Implementation Strategy for the Dual Transformation Region in the Brinson SMA Constitutive Model," *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 1, pp. N1~N5.
- (8) Brinson, L. C., 1993, "One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys : Thermal-mechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, pp. 229~242.
- (9) Brinson, L. C. and Huang, M. S., 1996, "Simplification and Comparisons of Shape Memory Alloy Constitutive Models," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, pp. 108~114.
- (10) Jo, M. and Kim, S., 2007, "Experimental Test and Numerical Simulation on the SMA Characteristics and Behaviors for Repeated Actuations," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 31, No. 3, pp. 373~379.